

Caractérisation et simulation du comportement thermique d'éco matériau composite à base de terre de barre et fibre de coco.

Ayihaou A. DJOSSOU¹, Koffi J. AGBELELE², Crédo A. A. M. M. GBEGBO², Aristide C. HOUNGAN²

¹Laboratoire des Procédés et de l'Innovation Technologique (LaPIT) de l'INSTI-Lokossa. BP 133 - Lokossa (Bénin),

²Laboratoire de Recherches Pluridisciplinaires de l'Enseignement Technique (LRPET) de l'ENSET-Lokossa

Résumé- Cette étude explore les performances thermiques et mécaniques d'un éco composite à base de la terre de barre et de fibres de coco en vue d'améliorer le confort thermique des bâtiments tout en limitant les impacts environnementaux. Des essais thermiques et mécaniques ont été faits avec des outils appropriés sur plusieurs mélanges de terre et fibres de coco. Des simulations ont été faites afin d'appréhender la distribution de la température à la surface et à l'intérieur du matériau. Les résultats ont montré que l'ajout de 3% à 4% de fibres améliore significativement la stabilité thermique et la résistance mécanique du composite.

Mots-clés : Composite, simulation, fibre de coco, caractéristiques thermiques, éco matériau.

Nomenclature

a Diffusivité thermique, $m^2 \cdot s^{-1}$
E Effusivité thermique, $J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \cdot s^{-0.5}$
L Longueur, m
m Masse, kg
 R_C Résistance thermique de contact, $K \cdot W^{-1}$

S Surface, m^2
T Température, K
t Temps, s

Lettres grecques :

λ Conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
 φ Flux de chaleur, W

1. Introduction

Le secteur de la construction est confronté à des défis croissants liés au changement climatique, à l'épuisement des ressources naturelles et à la nécessité d'améliorer le confort thermique des bâtiments tout en réduisant leur empreinte environnementale. Parmi les solutions envisagées, les matériaux composites à base de terre et de fibres végétales, comme les fibres de coco, suscitent un intérêt croissant. Ces matériaux naturels, en plus d'être renouvelables, présentent des propriétés mécaniques et thermiques adaptées aux exigences des constructions durables [1].

La terre de barre, un matériau argilo-sableux abondamment utilisé dans le sud du Bénin, est reconnue pour sa faible conductivité thermique et son inertie thermique élevée, qui favorisent la stabilité des températures intérieures [2]. Cependant, sa faible résistance mécanique et sa sensibilité à l'humidité limitent son utilisation à grande échelle. Pour surmonter ces limitations, l'ajout de fibres naturelles, telles que les fibres de coco, apparaît comme une solution innovante [3]. Les fibres de coco, issues de sous-produits agricoles, présentent des propriétés mécaniques remarquables et contribuent à améliorer la durabilité et les performances thermiques des matériaux composites [4].

Cette étude se concentre sur l'analyse des performances thermiques et mécaniques d'un composite à base de terre de barre et de fibres de coco, en vue de son utilisation dans la construction. À travers des essais expérimentaux et des simulations thermiques, nous visons à

déterminer les proportions optimales de fibres de coco pour renforcer le matériau tout en maintenant son confort thermique. Les résultats obtenus contribueront à promouvoir des pratiques de construction écologiques et économiquement viables, en adéquation avec les défis actuels de durabilité [5].

2. Matériaux étudiés

Pour mener à bien cette étude sur les composites terre de barre renforcés avec des fibres de coco, différents matériaux et équipements ont été mobilisés.

2.1. Terre de barre

La terre de barre (figure 1), matériau argilo-sableux, a été collectée dans des zones spécifiques du sud du Bénin (dans le département de l'Atlantique, commune de Tori-Bossito), principalement caractérisées par une texture homogène et une faible teneur en matière organique. Les propriétés essentielles de la terre de barre, telles que sa granulométrie, sa masse volumique et ses limites d'Atterberg, ont été déterminées conformément aux normes NF P94-051 (1993).

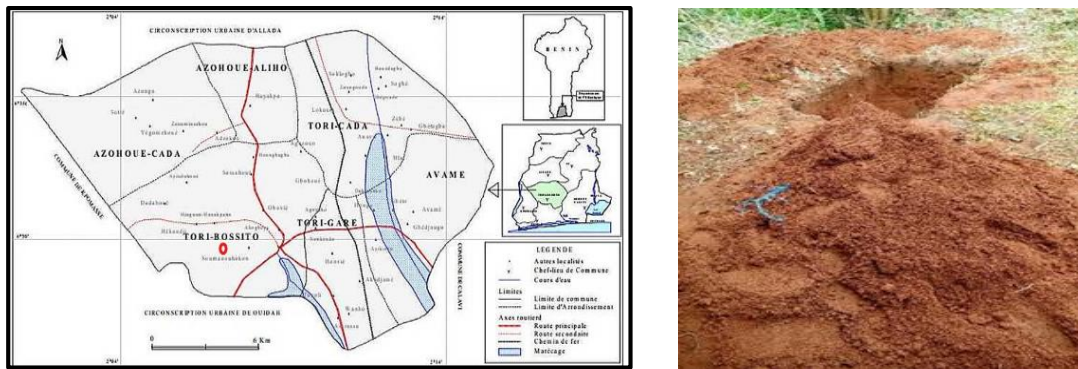


Figure 1 : Prélèvement de terre de barre

2.2. Fibre de coco

Les fibres de coco utilisées proviennent du mésocarpe de noix de coco, un sous-produit agricole abondant dans la région (figure 2). Elles ont été séchées et découpées en longueurs standardisées (de 2 à 5 cm). Elles présentent une densité variant de 1,15 à 1,45 g/cm³, une résistance à la traction compris entre 108 et 250 MPa et une forte capacité d'absorption d'eau (85–135 %) [3]. Ces dernières proviennent de Togbin-Daho, une localité du Bénin, située dans la commune d'Abomey-Calavi.



Figure 2 : Fibres de coco

2.3. Formulation des échantillons

Les échantillons ont été fabriqués sous forme de briquettes de dimensions $(4 \times 4 \times 6) \text{ cm}^3$, avec des proportions de fibres de coco de 1 %, 2 %, 3 % et 4 % en masse, mélangées à la terre de barre (figure 3). Après préparation, les briquettes ont été séchées à température ambiante avant d'être soumises à des essais de caractérisation mécaniques et thermiques. Les données collectées à partir de la caractérisation mécanique et thermique seront analysées afin de comprendre l'impact des proportions de fibres de coco sur les propriétés du composite. Les résultats de cette analyse permettront de proposer des recommandations sur les proportions optimales de fibres de coco à intégrer dans le composite pour atteindre un équilibre entre résistance et confort thermique.



Figure 3 : *Echantillons de terre de barre améliorée aux fibres de coco*

3. Caractérisation thermique des échantillons

Les propriétés thermophysiques des échantillons sont déterminées avec la méthode du ruban chaud.

3.1. Principe de la méthode du ruban chaud

La méthode du ruban chaud est constituée d'une simple résistance électrique plate et rectangulaire de longueur au moins égale 3 fois la largeur, et sur laquelle est posé un thermocouple en fils de faible diamètre. La mesure de la température est effectuée au centre de l'élément chauffant, ce qui évite d'avoir à prendre en compte les déperditions thermiques par les fils électriques à une extrémité de l'élément chauffant [6, 7]. L'élément chauffant est inséré entre deux échantillons identiques du matériau, de surfaces planes. Les dimensions des échantillons sont telles que la perturbation provoquée par l'échelon de flux ($\varphi = 0$ si $t < t_0$ et $\varphi = \varphi_0$ si $t > t_0$) imposé à la sonde n'atteigne aucune de leurs faces externes pendant la durée de la mesure (hypothèse du milieu semi infini). Le rapport longueur/largeur de la résistance est choisi de manière à ce que le transfert de chaleur au centre de la résistance puisse être considéré bidimensionnel pendant un temps inférieur à 180 s [6, 7]. La plus petite dimension des échantillons doit être supérieure à 1,5 fois la largeur totale du ruban. Le thermogramme correspondant au début (0 et 50 s) du chauffage (temps pendant lequel le transfert de chaleur au centre de la sonde reste unidirectionnel) est utilisé pour estimer l'effusivité thermique par la méthode du type plan chaud. une modélisation complète des transferts bidirectionnels dans les échantillons associée à une méthode d'estimation des paramètres permet d'utiliser le thermogramme entre 0 s et 180 s pour estimer la conductivité thermique. La figure 4 présente le dispositif expérimental du ruban chaud utilisé : 1- Alimentation stabilisée ; 2-Centrale d'acquisition ; 3-Résistance insérée entre 2 échantillons du matériau.

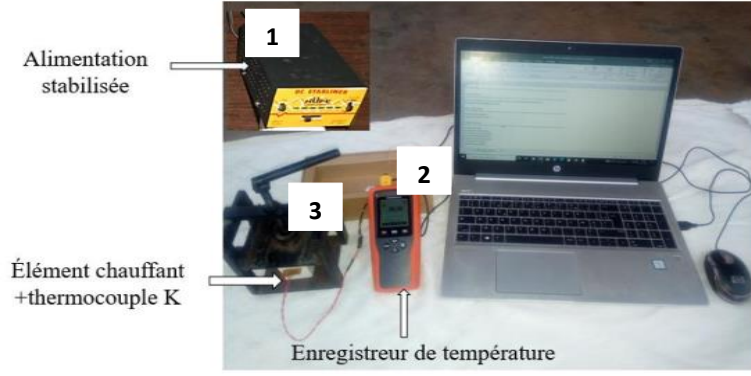


Figure 4 : *Dispositif expérimental du ruban chaud*

3.2. Estimation des paramètres

L'estimation de l'effusivité thermique se fait aux temps courts par régression linéaire du thermogramme $T_s(0, t) - T_s(0, 0)$ en fonction de \sqrt{t} entre 0 et 50 s (équation 1). Le coefficient directeur α de la droite permet d'obtenir l'effusivité par la relation 2.

$$T_s(0, t) - T_s(0, 0) = \frac{2\varphi_0}{ES\sqrt{\pi}} \sqrt{t} + \varphi_0 \left[R_c - \frac{(mc)_s}{(ES)^2} \right] \quad (1)$$

$$E = \frac{2\varphi_0}{\alpha S \sqrt{\pi}} \quad (2)$$

L'estimation de la conductivité thermique se fait aux temps longs par régression linéaire du thermogramme $T_s(0, t) - T_s(0, 0)$ en fonction de $\ln(t)$ entre 100 s et 180 s (équation 3). Le coefficient directeur β de la droite permet d'obtenir la conductivité par la relation 4.

$$T_s(0, t) - T_s(0, 0) = \frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \varphi_0 \left[R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right] \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\varphi_0}{\beta 4\pi L} \quad (4)$$

La diffusivité thermique est obtenue par :

$$a = \left(\frac{\lambda}{E} \right)^2 \quad (5)$$

4. Caractérisation mécanique

La caractérisation mécanique a été réalisée en premier pour évaluer le comportement mécanique du composite (figure 5). Les tests de compression ont permis de mesurer la capacité des briquettes à supporter des forces compressives, en utilisant une presse hydraulique pour appliquer la charge. De plus, des essais de flexion à trois points ont été effectués afin de déterminer la résistance à la rupture des échantillons lorsqu'une force est appliquée perpendiculairement à leur surface. Ces essais sont essentiels pour déterminer si le composite peut être utilisé dans des applications de construction, où la résistance mécanique est un critère primordial.



Compression



Flexion à trois points

Figure 5 : Essais mécaniques sur terre de barre améliorée aux fibres de coco

5. Résultats et discussions

5.1. Terre de barre

Les essais de granulométrie ont montré que la terre de barre est constituée principalement de sable (77,3 %), avec une proportion modérée de limon (5,4 %) et d'argile (15,3 %) (figure 6). Cette composition suggère que la terre de barre est un matériau relativement meuble et perméable, adapté à des applications où l'inertie thermique est cruciale, mais avec des limitations en termes de résistance mécanique sans renfort.

Les limites d'Atterberg de la terre de barre ont indiqué qu'elle est classée comme un matériau argileux à faible plasticité, ce qui signifie qu'elle présente une certaine stabilité sous des conditions normales, mais pourrait être sujette à des déformations en présence d'humidité excessive.

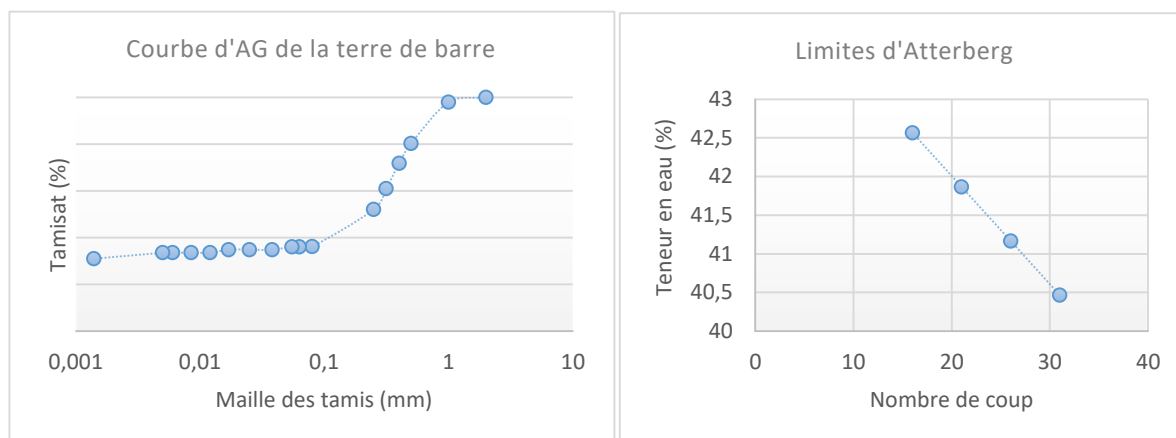


Figure 6 : Essais granulométriques

5.2. Fibre de coco

Selon une fiche technique de Interreg Sudoe de European Regional Development Fund (European Union)/ENERPAT, les fibres de coco présentent une faible conductivité de 0,037 à 0,045 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, une densité de 20 à 60 kg.m^{-3} , une chaleur spécifique de 1500 à 1800 $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, un coefficient de diffusion à la vapeur d'eau de 1 à 2 et un bilan CO_2 de 181 à 270 $\text{kg équivalent CO}_2.\text{m}^{-3}$; ce qui les rend utiles pour améliorer les performances thermiques du

composite [W1]. Leur capacité à réduire les transferts thermiques est un atout pour la régulation de la température dans les bâtiments.

5.3. Caractérisation mécanique de terre de barre améliorée aux fibres de coco

Les pourcentages de fibres de coco utilisés dans les mélanges étaient de 1 %, 2 %, 3 % et 4 % en poids, afin de déterminer l'impact de chaque proportion sur les performances mécaniques et thermiques du composite.

Les essais Proctor ont révélé que l'ajout de fibres de coco réduit la densité sèche maximale tout en augmentant la teneur en eau optimale. Cela est attribué à la faible densité des fibres et à leur capacité à retenir l'eau, en accord avec les observations de Kamgang et al. (2020), qui ont constaté des tendances similaires avec des composites renforcés de fibres naturelles [8]. Ces conditions ont permis un compactage optimal pour la préparation des échantillons.

Les essais de compression montrent une nette amélioration de la résistance avec l'ajout de fibres. Les briquettes sans fibres présentent une faible résistance (~1 kN), tandis que celles contenant 3 % et 4 % de fibres atteignent respectivement 3,5 kN et 4 kN. Ces résultats concordent avec ceux de Ghavami (2005), qui a démontré que les fibres naturelles renforcent la cohésion et limitent la propagation des fissures sous charge compressive [5]. Cependant, au-delà de 3 % de fibres, l'effet stabilisant commence à saturer, ce qui indique une limite à l'ajout de fibres.

En ce qui concerne la résistance à la flexion, les échantillons avec 3 % de fibres affichent les meilleures performances, combinant robustesse et flexibilité, un aspect également mis en avant par Kamgang et al. (2020) [8]. À 4 %, bien que la résistance reste élevée, la flexibilité diminue légèrement, probablement en raison de la formation d'un réseau de fibres trop rigide, comme observé par Upadhyay et al. (2015) [3].

5.4. Caractérisation thermique de terre de barre améliorée aux fibres de coco

Les tests thermiques ont permis d'évaluer la conductivité thermique, la diffusivité thermique et la capacité thermique volumique du composite (figure 7).

Les résultats de conductivité thermique montrent une réduction progressive de la conductivité thermique avec l'augmentation de la proportion de fibres de coco jusqu'à 3 %, où elle atteint son minimum. Les échantillons avec 0 % de fibres présentent une conductivité thermique relativement élevée, indiquant une moindre isolation thermique, tandis que ceux avec 2 % et 3 % de fibres offrent de meilleures performances. Ces observations corroborent les travaux de Khedari et al. (2001), qui ont constaté que l'ajout de fibres naturelles dans des composites réduisait leur conductivité thermique jusqu'à une certaine concentration, optimisant ainsi leur isolation thermique [1].

Par rapport à l'effusivité thermique, les échantillons à 3 % de fibres montrent également une effusivité thermique optimale, reflétant un équilibre entre la capacité du composite à absorber et à restituer la chaleur. Ces résultats sont conformes aux conclusions d'Osseni et al. (2016), qui ont rapporté une amélioration de l'effusivité thermique dans des composites à base de fibres naturelles [9].

En ce qui concerne la diffusivité thermique, indicatrice de la réactivité du matériau aux variations de température, elle diminue également avec l'ajout de fibres, atteignant des valeurs optimales à 3 % de fibres. Cela signifie que le composite peut absorber et dissiper la chaleur plus efficacement, une observation également rapportée par Sharma et al. (2015) pour des composites renforcés de fibres naturelles [10]. À 4 %, une légère augmentation de la diffusivité est observée, suggérant une saturation des effets des fibres.

Enfin, la capacité thermique volumique qui mesure la quantité de chaleur stockable par le matériau, diminue avec l'ajout de fibres de 0 % jusqu'à 3 % de fibres et augmente légèrement à 4 % de fibres. Cela permet au composite de stocker moins de chaleur et de mieux isoler le bâtiment. Ces résultats confirment les observations de Prabakar et Ramachandran (2002) sur l'amélioration de la régulation thermique des matériaux renforcés [11].

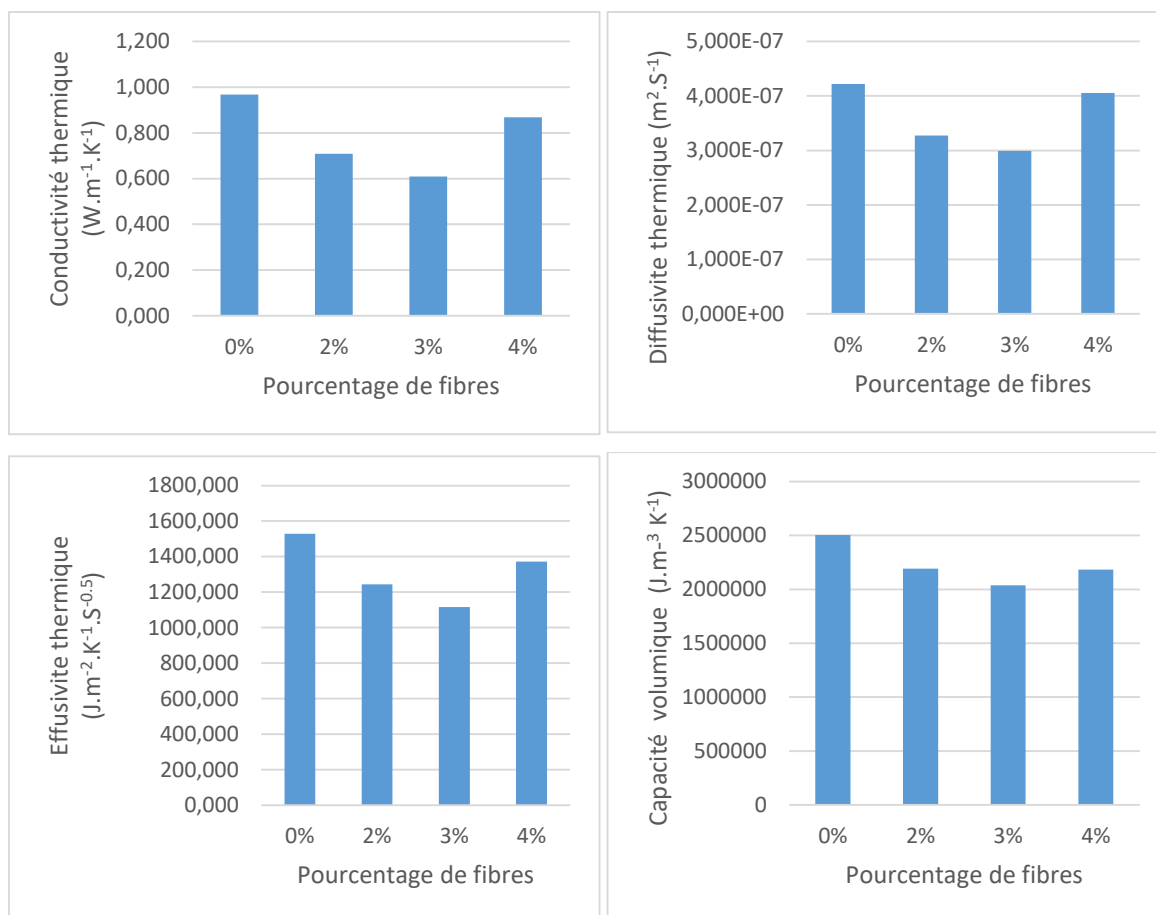


Figure 7 : Propriétés thermophysiques de terre de barre améliorée aux fibres de coco

L'ajout de fibres de coco dans le composite terre de barre améliore à la fois ses propriétés mécaniques et thermiques, avec des performances optimales pour une proportion de 3 % de fibres. Cette concentration permet d'obtenir un matériau à la fois robuste, flexible et thermiquement performant, adapté aux besoins de la construction durable. Ces résultats renforcent l'idée que les fibres naturelles, en particulier les fibres de coco, sont des éléments clés pour développer des matériaux de construction innovants, respectueux de l'environnement et efficaces dans des climats tropicaux.

Le tableau 1 présente la synthèse des résultats thermiques avec les écarts types sur les moyennes.

Pourcentage de fibres	Effusivité ($J.m^{-2}.K^{-1}.s^{1/2}$)	Ecart type ($J.m^{-2}.K^{-1}.s^{1/2}$)	Conductivité ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Ecart type ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	Diffusivité ($10^{-07} m^2.s^{-1}$)	Ecart type ($10^{-07} m^2.s^{-1}$)
0%	1528,708	28,351	0,967	0,093	4,219	1,012
2%	1244,720	30,318	0,709	0,007	3,271	0,214
3%	1114,931	10,959	0,610	0,009	2,993	0,006
4%	1372,715	44,926	0,868	0,013	4,055	0,345

Tableau 1 : Synthèse des Propriétés thermophysiques de terre de barre améliorée aux fibres de coco

5.5 Simulation via COMSOL Physics 3D

Les résultats issus de la simulation 3D sur un modèle de matériau composite sous forme de bloc 3D ($4 \times 4 \times 6$) cm³ montrent une réduction de 20 % des variations de température intérieure pour le composite contenant 3 % de fibres de coco, par rapport aux autres proportions et à la terre de barre seule (figures 8 et 9). Cette amélioration de l'amortissement thermique est attribuée à la capacité accrue du composite à résister à la transmission de l'onde thermique de manière plus stable. Ces résultats sont en ligne avec les conclusions de Sharma et al. (2015), qui ont observé des performances thermiques similaires dans des composites renforcés de fibres naturelles [10]. De plus, les simulations 3D de notre étude confirment l'impact positif de l'ajout de fibres de coco sur la stabilité thermique, comparé aux études d'Osseni et al. (2016), où des matériaux similaires ont montré une meilleure gestion thermique grâce aux fibres végétales [9].

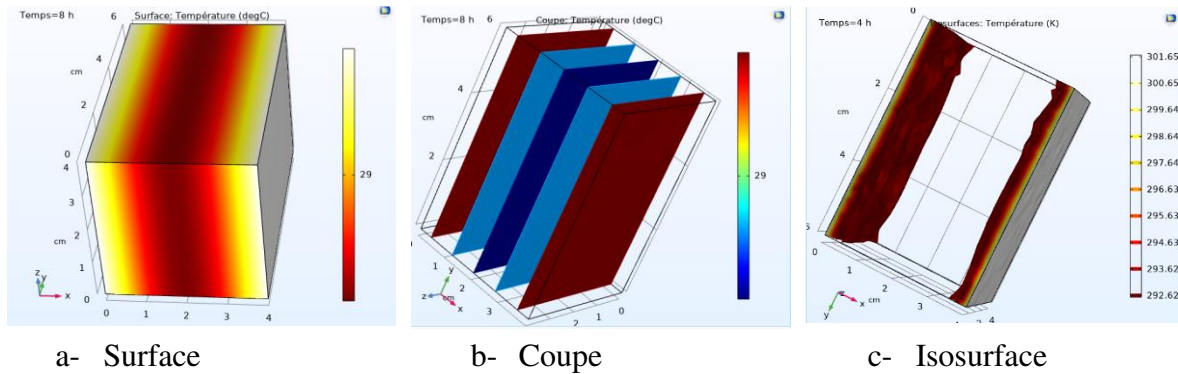


Figure 8 : Distribution de la température dans la terre de barre améliorée aux fibres de coco à 29 °C

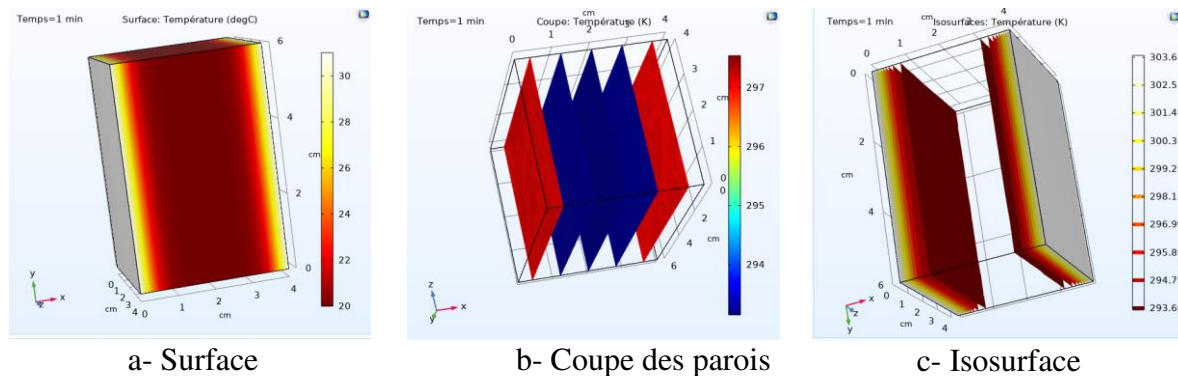


Figure 9 : Distribution de la température dans la terre de barre améliorée aux fibres de coco à 31 °C

6. Conclusion

Cette étude a mis en évidence les performances mécaniques et thermiques du composite terre de barre renforcé avec des fibres de coco. Les résultats montrent que l'ajout de fibres améliore significativement les propriétés du matériau, en particulier pour une proportion optimale de 3 % de fibres de coco. À cette concentration, le composite présente une résistance mécanique accrue et une meilleure isolation thermique. En perspective, une extension du pourcentage en fibres au-delà de 4 % permettrait de mieux apprécier le comportement thermique et mécanique du composite. Les écarts types relativement faibles obtenus sur les moyennes justifient la fiabilité des essais thermiques. Les simulations renforcent l'idée que 3 % de fibres de coco optimisent la performance thermique des composites, en réduisant les fluctuations de température intérieure tout en maintenant un bon confort thermique.

Références bibliographiques